

Cr⁴⁺ YAG 在 Nd YAG 激光器中的被动调 Q*

何江流 王加贤

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 在考虑 Cr⁴⁺ YAG 激发态吸收的情况下, 给出调 Q 速率方程组, 并且利用计算机对该方程组进行数值求解. 从而, 描绘出调 Q 过程中相关粒子数的变化情况, 得到脉冲宽度、脉冲能量、峰值光功率的理论值. 采用 Cr⁴⁺ YAG 晶体作为可饱和吸收体, 在脉冲式 Nd YAG 中实现了 1.06 μm 激光的调 Q 运转. 实验结果与理论结果相符合.

关键词 Cr⁴⁺ YAG, 被动调 Q, 速率方程组, 数值解

分类号 TN248.3⁺4

近年来, 掺四价铬离子(Cr⁴⁺)的晶体作为 Nd³⁺ 激光器的被动 Q 开关, 引起了人们广泛的研究兴趣^[1,2]. 在 1.06 μm 的激光波段上, 这类晶体有着大的吸收截面和低的饱和吸收光强, 并且具有光化学性质稳定、导热性能好、损伤阈值高等优点. 它既可以被用作脉冲式激光器的 Q 开关, 也可以作为连续激光器的 Q 开关. 本文在考虑激发态吸收的情况下, 从描述 Cr⁴⁺ YAG 调 Q 激光器的速率方程组出发, 通过计算机模拟和公式计算, 可以得到脉冲宽度、脉冲能量、峰值光功率的理论值. 并且利用 Cr⁴⁺ YAG 在脉冲式 Nd YAG 激光器中进行被动调 Q, 获得了脉宽为 20 ns, 能量为 125 mJ 的稳定调 Q 脉冲输出.

1 理论分析和计算

Cr⁴⁺ YAG 晶体属于四能级系统, 其可饱和吸收特性可由图 1 的四能级模型来描述. Cr⁴⁺ YAG 晶体对波长为 1.06 μm 的光吸收特性, 一个显著的特点就是它有较强的激发态吸收, 其基态和激发态吸收截面分别为 $\sigma_g = 7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, $\sigma_e = 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$. 另一特点是其饱和吸收的恢复时间

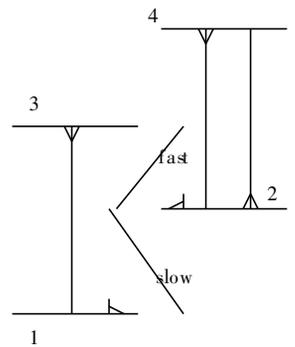


图1 Cr⁴⁺ YAG晶体的能级图

较长, 达到微秒量级, 第一激发态(能级 2)的弛豫时间 $\tau_1 = 3.4 \mu\text{s}$. 这类激发态寿命比调 Q 脉宽长很多的饱和吸收体, 属于慢饱和吸收体. 饱和吸收体被动调 Q 的理论分析, 一般基于速率方程. 对于 Cr⁴⁺ YAG, 考虑它的激发态吸收以及慢饱和吸收体的特性, 可以得出激光腔中光子数密度 $\varrho(t)$ 、激活介质反转粒子数密度 $n(t)$ 、饱和吸收体基态原子数 $n_1(t)$ 相互耦合的

微分方程组. 即

$$\frac{d\mathcal{Q}(t)}{dt} = \frac{\mathcal{Q}(t)}{t_r} \times [2l\sigma n(t) - 2\sigma_g dn_1(t) - 2\alpha d(n_0 - n_1(t)) - \ln(1/R) - \delta], \quad (1)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\gamma\sigma_c \mathcal{Q}(t) n(t), \quad (2)$$

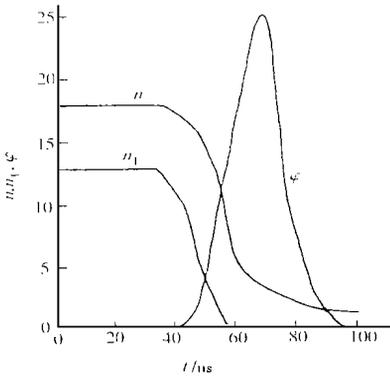
$$\frac{dn_1(t)}{dt} = -\sigma_{gc} \mathcal{Q}(t) n_1(t). \quad (3)$$

在式(1)~(3)中, σ, l 分别为激活介质的受激发射截面(cm^2)和长度(cm); σ_g, σ_c 分别为 Cr^{4+} YAG 的基态和激发态的吸收截面(cm^2); n_0 是 Cr^{4+} YAG 中 Cr^{4+} 粒子数密度(cm^{-3}); d 为 Cr^{4+} YAG 晶体的通光长度(mm); R 为输出反射镜的反射率; δ 为激光器的耗散性损耗; 光在腔中往返一周的时间为 $t_r, t_r = 2L/c, L$ 为光学谐振腔的长度(cm), c 是光速, γ 为反转因子, 对于四能级系统 $\gamma = 1$. 对联立方程(1~3)进行数值求解, 可得到 Cr^{4+} YAG 被动调 Q 脉冲的理论结果. 即腔内光子数密度 $\mathcal{Q}(t)$ 、激活介质反转粒子数密度 $n(t)$ 、吸收体基态原子数 $n_1(t)$ 随时间的变化曲线, 其中 $\mathcal{Q}(t)$ 正好描述了输出的调 Q 光脉冲的波形. 我们采用表 1 所列的参数进行计算, 所得的结果如图 2 所示. 其中图 2(a) 采用常值坐标, 很好地反映了输出脉冲的波形(图中为方便起见, $\mathcal{Q}(t), n(t), n_1(t)$ 被分别乘以 $6 \times 10^{-18}, 2 \times 10^{-17}$

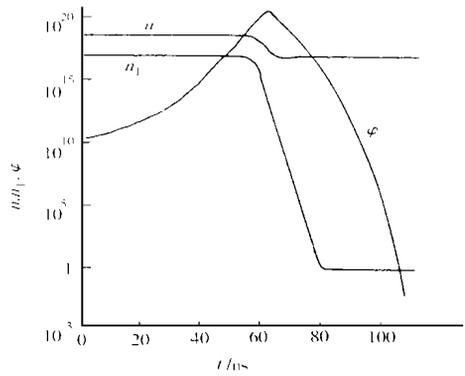
表 1 方程式(1~3)中的相关计算参数^①

σ	5.4×10^{-19}	γ	1
σ_g	7.0×10^{-18}	l	8
σ_c	5.0×10^{-19}	d	2
δ	0.408	R	0.15
n_0	4.62×10^{18}	L	60

① σ, δ 引自文献 [3], σ_g, σ_c 引自文献 [2], n_0 的值由公式 $T_0 = \exp(-\sigma_c n_0 d)$ 计算得到, T_0 是 Cr^{4+} YAG 的小信号透过率



(a) 采用均匀坐标



(b) 采用对数坐标

图 2 方程(1)~(3)的数值计算结果

和 0.6×10^{-16}); 图 2(b) 采用对数坐标, 则较好的反映了各粒子数的实际值. 由图 2 可以看出, 计算机模拟所得的脉冲宽度约为 18 ns. 图中还清楚地展示了调 Q 的物理过程. 即 Q 开关打开后, 腔内光子数密度迅速增加, 而增益介质中的反转粒子数迅速减小; 当反转粒子数降低到阈值时, 光强达到最大; 此后, 反转粒子低于阈值, 激光不再放大, 而且由于腔的损耗, 光强开始减弱, 从而形成一个强的激光脉冲输出.

按照文献 [4] 的方法, 还可以根据图 2 计算脉冲的能量 E 、峰值功率 P . 即

$$n_{10} = \frac{\ln(1/R) + \delta \ln(1/T_0^2) + \delta}{2\alpha} \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_E}{Y\sigma} \tag{5}$$

$$E = \frac{h\nu A}{2Y\sigma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \tag{6}$$

$$P = \frac{h\nu A L}{Yt_r} \ln(1/R) \left\{ n_i - n_t - n_{10} \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) - (n_i - n_{10}) \left[1 - \left(\frac{n_t}{n_i}\right)^\alpha \right] \right\} \alpha \tag{7}$$

在式(4)~(7)中, 参数 n_{10} 实际上代表 a 情况下脉冲峰值时的反转粒子数密度, n_i 为初始反转粒子数密度, n_t 为脉冲结束时的反转粒子数密度, n_t 为脉冲峰值时的反转粒子数密度, A 为光束在 Cr^{4+} YAG 晶体中的有效横截面积, $h\nu$ 是 $1.06 \mu\text{m}$ 光的光子能量. 由式(4)可得 $n_{10} = 2.74 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 由图 2 得 $n_i = 9.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $n_t = 3.89 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $n_t = 2.83 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. 将 n_i, n_t 代入式(6), 得到 $E = 142 \text{ mJ}$, 将 n_{10}, n_t, n_t, α 代入式(7), 得到 $P = 8.1 \times 10^6 \text{ W}$.

2 实验研究

2.1 实验装置

在实验中, 由平面镜 M_1 和全反射凹面镜 M_2 构成平凹腔. 输出镜 M_1 的透过率为 15%, M_2 的曲率半径为 3 m. F 为可变光阑, 用来抑制高阶横模振荡以保证激光器基横模运转. L 为 $4.5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的 Nd YAG 棒由两根脉冲氙灯泵浦, 其左端面与 M_1 镜距离 120 mm, 右端面与 M_2 镜的距离在实验中调整以改变腔长. 实验装置如图 3 所示. 激光器的工作重复率为每秒 1 次. Cr^{4+}

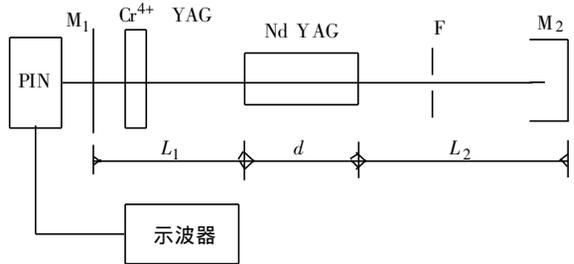


图3 Nd YAG激光器中 Cr^{4+} YAG被动调Q的实验装置

YAG 晶体通光长度为 2 mm, 对 $1.06 \mu\text{m}$ 连续光的小信号透过率为 63%. 晶体用铝皮包裹并加水冷. 脉冲能量由 PT-1 型激光能量计测量, 脉冲波形由 PIN 管构成的探测器接收, 并输入到惠普公司 54502A 型 400 MHz 数字示波器上进行存储和显示.

2.2 实验结果

在腔长 $L = L_1 + L_2 + d/n_0 = 60 \text{ cm}$ (d 为 Nd YAG 棒的长度, n_0 为棒的线性折射率), 泵浦能量为 110 J 的条件下, 我们获得了非常稳定的光滑的调 Q 脉冲波形, 如图 4 所示. 从图中可以看出, 单脉冲的半功率点宽度约为 20 ns. 改变示波器的扫描速度, 可以看出序列中脉冲间隔为 20 μs , 输出的能量经测量为 $E = 125 \text{ mJ}$, 脉冲能量的峰值功率 $P = E/T = 6.25 \times 10^6 \text{ W}$. 这与前面的理论结果相当接近.



图4 单脉冲调 Q 波形(水平坐标 $20 \text{ ns} \cdot \text{div}^{-1}$)

3 结束语

Cr^{4+} YAG 晶体具有宽的吸收带和良好的饱和吸收特性,并且光化学稳定性和导热性能都很好.因此,它是高功率、高重复率及小型全固化激光器的理想的被动 Q 开关.本研究用 Cr^{4+} YAG 晶体在脉冲式 Nd YAG 激光器中调 Q,获得脉宽为 20 ns,能量为 125 mJ 的巨脉冲.而且在调 Q 速率方程组的基础上,利用计算机数值求解,描绘出调 Q 过程中各参数的变化,理论结果和实验结果基本相符合.

本文为校科研资金资助项目.

参 考 文 献

- 1 欧阳斌,丁彦华. Cr^{4+} YAG 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究. 光学学报, 1996, 16(12): 1555 ~ 1669
- 2 王加贤,张文珍. Cr^{4+} YAG 被动调 Q 与被动锁模的研究. 华侨大学学报(自然科学版), 1999, 20(1): 25 ~ 29
- 3 赵圣之,张行愚,王青圃等. NYAB 晶体 Cr^{4+} YAG 被动调 Q 的激光特性的研究. 中国激光, 1999, A26(1): 6 ~ 10
- 4 Xinyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang. Optimization of Cr^{4+} -doped saturable-absorber Q-switched lasers. IEEE J. of Quantum Electronics, 1997, 33(12): 2286 ~ 2294

Cr^{4+} YAG Passive Q-Switching in Nd YAG Laser

He Jiangliu Wang Jiaxian

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract Taking into account the absorption of Cr^{4+} YAG in excitation state, the Q-switching rate equations are given and the equations are solved numerically by using computer. Thus the change of correlated population during Q-switching is described and the theoretical values of pulse width and energy of pulse and peak luminous power are obtained. By adopting Cr^{4+} YAG as saturable absorber, the Q-switching operation of 1.06 μm laser is realized in pulsed Nd YAG.

Keywords Cr^{4+} YAG, passive Q-switching, rate equations, numerical solution